



強磁性トンネル接合を用いた生体磁場検出用高感度磁気センサに関する研究

著者	西川 卓男
号	58
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第004868号
URL	http://hdl.handle.net/10097/58911

氏名	にしかわ たくお 西川 卓男
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成 25 年 9 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）応用物理学専攻
学位論文題目	強磁性トンネル接合を用いた生体磁場検出用 高感度磁気センサに関する研究
指導教員	東北大学教授 安藤 康夫
論文審査委員	東北大学教授 安藤 康夫 東北大学教授 佐久間 昭正 東北大学教授 北上 修 東北大学准教授 大兼 幹彦

論文内容要旨

背景及び研究の目的（第 1 章）

生体に電気が存在する事は古くから知られていたが，電気と同時に発生する磁場は極めて微弱なため（ $10^{-11} \sim 10^{-15}$ T），生体磁気の研究は立ち遅れていた．しかし，現在，生体磁場測定装置は脳波や心電図とともに，無くてはならない診断装置となっている．従来，生体磁場に関する研究は，超伝導量子干渉素子（SQUID）を用いて行われてきた．しかし，素子を冷却する必要があるために，装置が大型で高価という問題があった．

本研究では，新しい生体磁場検出用センサとして，強磁性トンネル接合（TMR 素子）に着目した．TMR 素子は，強磁性体/絶縁体/強磁性体三層構造を基本とする素子で，2 つの強磁性層の磁化の相対角度によって抵抗が変化する（TMR 効果）．この TMR 効果を利用して，磁気センサ素子として機能させることが可能であり，ハードディスクの再生ヘッド等に既に応用がなされている．TMR 磁気センサ素子は室温動作，低価格，身体に密着させての測定が可能である．生体磁場の計測が TMR センサで可能になれば，医療診断の発展に大きく貢献できる．しかし，そのためには，超微小磁場を計測可能な，高感度かつ低ノイズの磁気センサ素子を開発する必要がある．

本研究の目的は，心臓磁場（ $\sim 10^{-11}$ T）検出を可能とする TMR 磁気センサ素子を開発することである．そのために，以下の 3 点を目標とした．

1. 生体磁場応用に特化した TMR 素子の設計を行う．
2. 微小磁場評価装置，微小信号検出回路の設計及び作製を行う．
3. 生体磁場用 TMR 磁気センサモジュールを作製し，擬似心臓磁場信号を検出する．

TMR センサ素子の作製方法（第 2 章）

本研究で作製した TMR 素子の膜構造を図 1 に示す．MgO 絶縁層より上層は外部磁場に応答しない磁化固定層である．一方，MgO 絶縁層より下層が外部磁場に応答する磁化自由層である．TMR センサ

の磁場感度 ($= \text{TMR} / 2H_k$) を高めるためには、TMR 効果を増大させること、および、自由層の異方性磁場 (H_k) を低減する必要がある。本研究では、自由層に NiFe/Ru/CoFeB の 3 層構造を用いており、NiFe の軟磁気特性と、CoFeB による大きな TMR 効果の両立ができる。先行研究により、この自由層を有する単体の TMR 素子は、約 25%/Oe の高い磁場感度を示すことが分かっている。また、TMR 素子をセンサとして用いるためには、自由層と固定層の磁化容易軸を直交させる必要がある。本研究では、容易軸を直交させるために二度の磁場中熱処理を行った。

生体磁場は数 Hz ～ 数 100Hz の低周波の信号であるが、TMR 素子は低周波領域で $1/f$ ノイズを示すことが知られている。本研究では $1/f$ ノイズを低減する方法として、直並列に TMR 素子をアレイ化する手法を用いた。フォトリソグラフィによる微細加工プロセスにて 100×100 個の TMR 素子の集積化を行った。

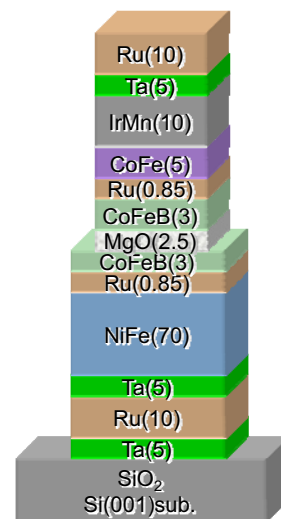


図 1. TMR 多層膜の膜構造

実験結果

1. 生体用 TMR センサの設計 (第 3 章)

生体からの磁場の湧き出し、沈み込みの両方向について測定を可能にするため、ゼロ磁場において磁化平行時、反平行時の中間抵抗値をとる設計とした。中間抵抗値は、消費電力と生体に対する安全性を考慮して 2 k Ω とした。その抵抗値を得るために、MgO 絶縁層膜厚は 2.5 nm とし、TMR 素子の面積を 100 μm^2 と決定した。以上の条件の下で、TMR 素子を生体センサとして応用した場合の検出可能磁場の見積もりを行った。その結果、100 %/Oe の磁場感度で脳磁場信号を、本研究の目的である心磁場相当の計測を 10 %/Oe 以上の磁場感度で実現できる事を明らかにした。

2. 微小磁場評価装置、微小信号検出回路の設計及び作製 (第 4 章、第 5 章)

既存のシステムとして、TMR センサ性能を微小磁場領域において評価するための装置が無く、装置の仕様作成から構築までのすべてを行った。磁気シールドとして、パーマロイの 2 重シールドボックスを作製した結果、目標とする 1/1000 の外部磁場減衰率を達成することができた。また、微小磁場発生系としてワンターンヘルムホルツコイルを作製した。シミュレーションにより、コイルサイズや、シールドボックス内の設置位置を最適化し、最終的に $\phi 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ の円筒空間で 0.1 %の誤差範囲で均一磁場を得る事ができた。以上の装置を組み合わせ、さらに、制御システムも作成することで、生体応用に特化した TMR センサ素子用の微小磁場測定系が完成した。

検出回路として、TMR 素子特性の温度変動に対応可能な、ハーフブリッジ回路を独自に考案した。さらに、100 dB の増幅率を有し、入力換算電圧ノイズレベルが、10 k Ω の抵抗実装でわずか 20 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 10 Hz の超低ノイズアンプを作製することに成功した。これらを組み合わせることで、ナノボルト程度の微小信号を検出可能な回路が作製できた。

3. 生体磁場用 TMR 磁気センサモジュールの作製および擬似心臓磁場信号の検出（第 6 章）

TMR 素子の集積化プロセスにおいて、層間絶縁膜形成および磁場中熱処理工程の改善を行い、 100×100 個のアレイ素子において、 $15 \text{ \%}/\text{Oe}$ の磁場感度を得た。また、ノイズレベルとしては $250 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10 Hz を得た。さらに、作製した磁気センサモジュールを用いて、 pT オーダーの磁場検出に成功した。また、心磁場信号のような帯域を持った擬似信号に対しても十分測定できる事を実証した（図 2）。以上で述べた、TMR アレイ素子の感度向上、アンプの低ノイズ化により、TMR 素子を用いたセンサデバイスで、世界で初めて生体磁場レベルの信号を捉える事に成功した。

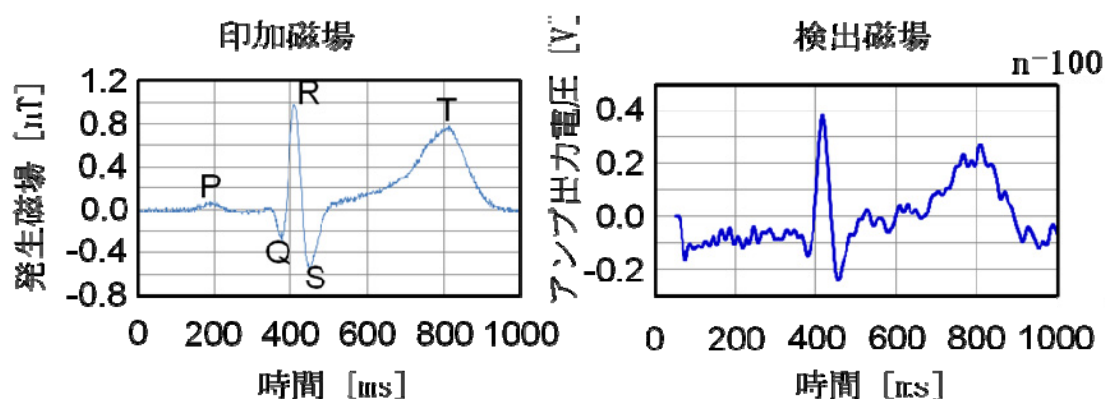


図 2. QRS 波 1 nT の擬似心磁波形(左)と TMR センサデバイスでの検出波形(右)

総括（成果）（第 7 章）

本研究では、TMR センサによる生体磁場計測を目的として、素子の感度向上とノイズ低減を行った。また、生体信号検出用のシステム全体を構築した。それらの結果と意義を以下に述べる。

1. 高感度集積化 TMR センサの作製

本研究では、TMR 素子によって検出可能な磁場の大きさを検討した。その結果、実現可能な TMR 素子の磁場感度範囲において、生体磁場が計測可能であることを明らかにした。また、現行の SQUID 心磁計、SQUID 脳磁計と同等の検出能力を持ち得る事を明らかにした。

TMR 素子の自由層と固定層を直交させる事によって、生体からの湧き出しおよび沈み込み、双方の磁場検出に対応した集積化 TMR デバイスを実現した。また、集積化 TMR デバイスの問題であった歩留まりを、層間絶縁膜形成工程の改善により解消するとともに、ゼロ磁場抵抗値を中間抵抗値にする事に成功した。また、磁場感度として、生体信号が検出可能な $15 \text{ \%}/\text{Oe}$ という値を得た。この感度は集積化 TMR センサとしては現在最高値である。

2. 低ノイズ増幅回路の作製

生体磁場検出用 TMR センサに特化した増幅回路を作製した。また、増幅回路のノイズを、ほぼ熱雑

音レベルにまで低下させた。デバイスの小型化にも成功し、実用レベルの TMR センサモジュールが作製できた。また、微小な温度変化に追従し、かつ、TMR センサの抵抗ばらつきにも対応可能な新規差動増幅回路を考案した。

3. TMR センサを用いた擬似生体信号の検出

生体磁場用 TMR センサの特性を評価するための測定系が無かったため、そのシステムの構築を行った。生体信号に模した微小磁場の発生系と、微小信号を低ノイズ環境で評価できるシステムが完成した。また、試作した TMR センサモジュールを用いて、擬似心磁場波形で QRS 波 6×10^{-11} T の計測に成功した。これはヒトの実心磁信号と同等レベルの信号検出であり、センサ型 TMR 素子を生体磁場計測に応用できる事を初めて示した。

今後の展望

本研究では擬似心磁信号の検出に成功したが、今後は更に雑磁場、雑電界を遮断させる環境を整備し、TMR センサの S/N 比 10 倍を実現することで実心磁の検出を目指す。また、TMR センサの更なる感度向上を行うことで、脳磁計測に関する研究も推進する。現状の SQUID 脳磁計、心磁計は優れた医療機器であるが、これらが液体ヘリウムの枯渇問題やコストの高騰問題などで研究に歯止めがかかっている状況であるのに対し、室温型 TMR センサを実現することでこの問題を解決することができると考えている。

室温型 TMR センサは様々な可能性を秘めており、今まで足枷になっていた液体ヘリウム、液体窒素が必要無くなるので、今後様々な分野において応用されと考えられる。医療の発展、工業・産業の発展のためにも TMR センサの更なる高性能化を進めていきたい。

論文審査結果の要旨

第1章は序論である。磁気センサの従来技術と実際に関して説明した後、生体磁気のメカニズムおよびその従来検出技術について述べている。また、この生体磁場を強磁性トンネル接合でセンシングする際に問題となってくるデバイスの構造、感度、ノイズに関する一般論を述べている。これらの背景をもとにして、目的と実現目標を掲げている。

第2章は実験方法である。強磁性トンネル接合を成膜後、フォトリソグラフィにより微細加工を行い、所望のアレイ構造を作製する。得られた素子はピン層およびフリー層の異方性の制御を行うために2度の熱処理を行う。そのプロセスの詳細に関して述べている。また磁気抵抗曲線、結晶構造、微小磁場測定方法について述べている。

第3章は生体用 TMR センサの設計について述べている。生体からの磁場の湧き出し、沈み込みの両方向について測定を可能にするため、ゼロ磁場において磁化平行時、反平行時の中間抵抗値をとる設計とした。中間抵抗値は、消費電力と生体に対する安全性を考慮して $2\text{ k}\Omega$ とした。その抵抗値を得るために、MgO 絶縁層膜厚は 2.5 nm とし、TMR 素子の面積を $100\text{ }\mu\text{m}^2$ と決定した。以上の条件の下で、 $100\text{ }\%/Oe$ の磁場感度で脳磁場信号を、本研究の目的である心磁場相当の計測を $10\text{ }\%/Oe$ 以上の磁場感度で実現できる事を明らかにした。

第4章は微小磁場評価系の開発について述べている。磁気シールドとして、パーマロイの2重シールドボックスを作製した結果、目標とする $1/1000$ の外部磁場減衰率を達成することができた。また、微小磁場発生系としてワンターンヘルムホルツコイルを作製した。シミュレーションによる最適化の結果、最終的に $\phi 15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ の円筒空間で $0.1\text{ }\%$ の誤差範囲で均一磁場を得る事ができた。以上の装置を組み合わせ、さらに、制御システムも作成することで、生体応用に特化した TMR センサ素子用の微小磁場測定系が完成した。

第5章は微小信号検出回路の開発について述べている。検出回路として、TMR 素子特性の温度変動に対応可能な、ハーフブリッジ回路を独自に考案した。さらに 100 dB の増幅率を有し、入力換算電圧ノイズレベルが、 $10\text{ k}\Omega$ の抵抗実装でわずか $20\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10 Hz の超低ノイズアンプを作製することに成功した。これらを組み合わせることで、ナノボルト程度の微小信号を検出可能な回路が作製できた。

第6章はシステムの評価と擬似心臓磁場信号の検出について述べている。TMR 素子の集積化プロセスにおいて、層間絶縁膜形成および磁場中熱処理工程の改善を行い、 100×100 個のアレイ素子にはおいて、 $15\text{ }\%/Oe$ の磁場感度を得た。また、ノイズレベルとしては $250\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10 Hz を得た。さらに、作製した磁気センサモジュールを用いて、 pT オーダーの磁場検出に成功し、心磁場信号のような帯域を持った擬似信号に対しても十分測定できる事を実証した。以上で述べた TMR アレイ素子の感度向上、アンプの低ノイズ化により、TMR 素子を用いたセンサデバイスで、世界で初めて生体磁場レベルの信号を捉える事に成功した。

第6章は総括である。本研究で試作した TMR センサモジュールを用いると、ヒトの実心磁信号と同等レベルの信号検出が可能であり、今後、他の生体磁場検出への発展が期待できる。以上のように、本論文はセンサ型 TMR 素子を生体磁場計測に応用できる事を初めて示したものであり、応用物理学分野における工学的発展に寄与するものである。

従って本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。